

ZASTOSOWANIE ALGORYTMU „POJEDYNCZEGO OKNA” DO OPRACOWANIA MAP TEMPERATURY POWIERZCHNI ZIEMI NA PODSTAWIE DANYCH SATELITARNYCH LANDSAT

APPLICATION OF SINGLE-CHANNEL ALGORITHM FOR MAPPING LAND SURFACE TEMPERATURE BASED ON LANDSAT SATELLITE DATA

Jakub Walawender ^{1,2}, Monika Hajto ³, Piotr Iwaniuk ⁴

¹ Ośrodek Teledetekcji Satelitarnej,

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy, Oddział w Krakowie

² Zakład Klimatologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Wydział Biologii i Nauk o Ziemi,
Uniwersytet Jagielloński, Kraków

³ Zakład Monitoringu i Modelowania Zanieczyszczeń Powietrza,
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy, Oddział w Krakowie

⁴ Dział Wsparcia Technicznego, ESRI Polska Sp. z o.o., Warszawa

Słowa kluczowe: satelitarna teledetekcja termalna, satelity serii LANDSAT, algorytm „pojedynczego okna”, temperatura powierzchni czynnej, GIS, zróżnicowanie przestrzenne warunków termicznych miasta

Keywords: thermal satellite remote sensing, LANDSAT series satellites, single-channel algorithm, land surface temperature maps, GIS, spatial variability of thermal conditions in urban areas

Wstęp

Satelitarne obrazy termalne wykorzystywane są do opracowania map temperatury powierzchni czynnej Ziemi (LST – *Land Surface Temperature*), które mają zastosowanie m.in. do badań zaburzeń warunków termicznych w obrębie obszarów zurbanizowanych, spowodowanych zmianami właściwości podłoża oraz emisji sztucznego ciepła. Dane satelitarne umożliwiają pozyskanie informacji o charakterze ciągłym w przestrzeni, co jest ich podstawową zaletą w konfrontacji z danymi pochodzącymi z tradycyjnych pomiarów punktowych, prowadzonych przy powierzchni gruntu. Zastosowanie danych zarejestrowanych przez satelity serii LANDSAT o rozdzielczości przestrzennej obrazów termalnych wynoszącej: 120 x 120 m (radiometr TM) i 60 x 60 m (radiometr ETM+) umożliwia przeprowadzenie bardzo szczegółowych badań złożonej struktury termicznej powierzchni miasta.

Jednym ze sposobów tworzenia dokładnych map temperatury powierzchni Ziemi na podstawie danych LANDSAT jest zastosowanie algorytmu „pojedynczego okna” (*Single-Channel Algorithm*), opracowanego przez J.C. Jiménez-Munoz i J.A. Sobrino (2003) z Uniwersytetu w Walencji. Za wyborem tego algorytmu przemawia jego nieustanny rozwój i korzystne wyniki testów w porównaniu z innymi metodami obliczania LST (Sobrino i in., 2004; Jiménez-Munoz i in., 2009; Cristóbal i in., 2009). Algorytm autorstwa Jiménez-Munoz i Sobrino jest skomplikowany i wymaga sporej liczby przetworzeń. Dlatego niezbędnym rozwiązaniem było opracowanie zestawu narzędzi, umożliwiającego zautomatyzowanie procedury. Opracowany zestaw narzędzi *TRS (Thermal Remote Sensing) Tools* jest implementacją algorytmu „pojedynczego okna” w programie ESRI ArcGIS Desktop. Zintegrowanie algorytmu z innymi narzędziami edycji, przetwarzania i wizualizacji danych przestrzennych, dostępnymi w środowisku GIS, umożliwia prowadzenie dalszych analiz w powiązaniu z danymi z różnych źródeł oraz sprawną wizualizację w postaci map wynikowych.

W artykule scharakteryzowano dane LANDSAT pod kątem możliwości ich wykorzystania w badaniach warunków termicznych w obrębie obszarów zurbanizowanych. Opisano w sposób szczegółowy procedurę tworzenia map temperatury powierzchni na podstawie danych LANDSAT z zastosowaniem algorytmu „pojedynczego okna” i zaprezentowano autorski zestaw narzędzi *TRS Tools* dla programu ArcGIS Desktop. Ponadto, przedstawiono i scharakteryzowano przykładową mapę temperatury powierzchni obejmującą zasięgiem obszar Krakowa i okolice miasta. Omówiono również możliwości dalszego przetwarzania warstw LST z wykorzystaniem narzędzi GIS.

Satellite LANDSAT i możliwości ich wykorzystania w badaniach struktury termicznej powierzchni miast

Historia realizowanego przez NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) i USGS (*U.S. Geological Survey*) programu satelitarnego LANDSAT sięga 23 lipca 1972 roku, kiedy wystrzelony został pierwszy z serii satelitów, których pierwotnym celem było pozyskiwanie obrazów powierzchni lądów do badań przemian środowiska przyrodniczego. Pierwsze satelity tej serii (LANDSAT 1-4) wyposażone były w system kamer telewizyjnych oraz radiometr MSS (*MultiSpectral Scanner*) rejestrujący obraz w czterech zakresach spektralnych o rozdzielczości przestrzennej 79x56 m. Pierwsza generacja satelitów LANDSAT nie miała jednak możliwości rejestrowania obrazu w zakresie podczerwieni termalnej. Dopiero nowy radiometr TM (*Thematic Mapper*), zainstalowany na pokładzie umieszczonego na orbicie 1 marca 1984 roku satelity LANDSAT-5, umożliwił pozyskiwanie obrazów termalnych o rozdzielczości przestrzennej 120x120 m¹. Poza kanałem termalnym (zakres: 10,4-12,5 μm), radiometr TM rejestruje obrazy w sześciu innych zakresach spektralnych w rozdzielczości przestrzennej 30x30 m: 3 kanały w zakresie widzialnym: 0,45-0,52 μm (VIS Blue), 0,52-0,6 μm (VIS Green), 0,63-0,69 (VIS Red), kanał w bliskiej podczerwieni (NIR) w zakresie: 0,76-0,9 μm oraz 2 kanały w podczerwieni średniej (MIR) w przedziałach

¹ Rozdzielczość obrazów w kanale termalnym jest niższa niż w pozostałych kanałach, ponieważ odbierany w zakresie podczerwieni termalnej sygnał jest znacznie słabszy niż w zakresie promieniowania widzialnego oraz bliskiej i średniej podczerwieni. Aby moc sygnału była wystarczająca do wywołania reakcji w detektorze, pole widzenia musi być większe (Osińska-Skotak, Madany, 1998).

długości fali: 1,55-1,75 μm i 2,08-2,35 μm . Satelita LANDSAT-5 działa nieprzerwanie po dziś dzień, co oznacza że seria danych zarejestrowanych przez radiometr TM ma przeszło 27 lat.

Wystrzelony 5 października 1993 roku LANDSAT-6 wskutek problemów technicznych nie osiągnął orbity.

Aktualnie na orbicie znajduje się jeszcze jeden (ostatni z dotychczas wystrzelonych) satelita serii LANDSAT oznaczony numerem 7. Eksploatowany od 15 kwietnia 1999 roku satelita posiada na swoim pokładzie unowocześniony radiometr ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*). Wykonuje on obrazy powierzchni Ziemi w tych samych zakresach spektralnych co radiometr TM, przy czym został dodatkowo wzbogacony o kanał panchromatyczny o podwyższonej rozdzielczości przestrzennej 15x15 m (zakres widzialny poszerzony o bliską podczerwień: 0,5-0,9 μm). Zwiększona została również rozdzielczość przestrzenna kanału termalnego do 60x60 m. Niestety w maju 2003 awarii uległ jeden z elementów instrumentu ETM+ i od tamtej pory dane dostarczane przez satelitę nie są pełnowartościowe.

Satelity LANDSAT-5 i LANDSAT-7 poruszają się po orbitach kołowych, prawie biegunowych, heliosynchronicznych znajdujących się na wysokości 705 km. Kąt nachylenia osi orbity do płaszczyzny równika wynosi 98,2°, czas obiegu satelity wokół Ziemi – 99 minut, a okres rewizyty 16 dni. Szerokość pasa obrazowania wynosi 185 km (Irish, 2003, *Landsat Program webpage*).

Najdłuższy program satelitarnych obserwacji powierzchni Ziemi będzie kontynuowany w przyszłości. Na grudzień 2012 roku zaplanowano wystrzelenie satelity LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*) – następcy LANDSAT-7.

Na podstawie analizy porównawczej map temperatury powierzchni opracowanych na podstawie obrazów termalnych LANDSAT-5/TM i analogicznych obrazów pozyskanych przez satelity Terra/MODIS, Meteosat-9/SEVIRI i NOAA-17/AVHRR w tym samym czasie, określono słabe i mocne strony danych LANDSAT w kontekście ich wykorzystania do badań warunków termicznych w obszarach zurbanizowanych (Walawender, Hajto, 2009). Wśród zalet należy wymienić dużą rozdzielczość przestrzenną obrazów termalnych (TM – 120x120 m, ETM+ – 60x60 m), która daje możliwość określenia szczegółowych zależności w rozkładzie temperatury powierzchni miasta oraz badania zróżnicowania warunków termicznych w obrębie miasta w zależności od rodzaju użytkowania powierzchni miejskiej (w skali pojedynczych budynków, ulic, parków, cieków wodnych itd.), jak również identyfikację pojedynczych źródeł emisji ciepła antropogenicznego. Inną zaletą jest długa, 27-letnia seria dostępnych danych dla radiometru TM. Z drugiej strony, poważnym mankamentem danych LANDSAT jest mała rozdzielczość czasowa. Satelita rejestruje obraz tego samego obszaru co 16 dni, o stałej porze dnia, co ogranicza możliwość wykorzystania tych danych do badań zmienności temperatury powierzchni w skali dobowej, miesięcznej i rocznej, biorąc pod uwagę, że znaczna liczba dostępnych scen jest zachmurzona. Z tego względu dane LANDSAT znajdują przede wszystkim zastosowanie w analizach typu *case study* (studium przypadku) w celu detekcji emitorów ciepła i obszarów chłodu w przestrzeni miejskiej. Ograniczeniem danych LANDSAT z punktu widzenia metodyki przeliczenia wartości pikseli obrazu termalnego do wartości temperatury powierzchni jest tylko jeden kanał termalny radiometrów TM i ETM+, co wymusza stosowanie algorytmów „pojedynczego okna” (*mono-window/single-channel*).

Za odbiór, przetwarzanie i archiwizację danych LANDSAT oraz za opracowanie i dystrybucję produktów satelitarnych opracowanych na bazie tych danych odpowiada USGS. W styczniu 2009 roku archiwum danych LANDSAT zgromadzonych przez USGS zostało otwarte. Tym samym, praktycznie wszystkie dane zarejestrowane przez satelity LANDSAT-5/TM i LANDSAT-

7/ETM+ zostały udostępnione bezpłatnie. Dostęp do danych ułatwiają specjalnie utworzone internetowe przeglądarki: GLOVIS (*The USGS Global Visualisation Viewer*) pod adresem <http://glovis.usgs.gov> oraz *EarthExplorer* <http://edcsns17.cr.usgs.gov/NewEarthExplorer/>.

Procedura obliczania temperatury powierzchni Ziemi na podstawie danych LANDSAT

W artykule prezentowana jest metoda obliczania temperatury powierzchni Ziemi na podstawie danych LANDSAT z wykorzystaniem algorytmu „pojedynczego okna” (*Single-Channel Algorithm*) opracowanego przez Jiménez-Munoz i Sobrino (2003). Procedura składa się z 5 etapów.

Etap 1

Konwersja wartości pikseli obrazu termalnego LANDSAT TM i ETM+ (w formacie LPGS) do rejestrowanej przez czujnik radiancji spektralnej L_s (w $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) zgodnie z równaniem:

$$L_s = gain \cdot DN + bias \quad (1)$$

gdzie: DN (*Digital Number*) to wartość piksela; $gain$ (nachylenie) i $bias$ (przesunięcie) to współczynniki konwersji DN do radiancji.

Wartości $gain$ i $bias$ dla kanału termalnego radiometru TM i ETM+ zawarto w tabeli.

Tabela. Wartości stałe stosowane w algorytmie „pojedynczego okna” dla kanału termalnego radiometrów TM i ETM+ (Chander i in., 2009)

Stała [jednostka]	Landsat-5/TM kanał 6	Landsat-7/ETM+ kanał 6
$gain$	0,055376	0,037205
$bias$	1,18	3,162795
K_1 [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$]	607,76	666,09
K_2 [K]	1260,56	1282,71
λ [μm]	11,457	11,27

Etap 2

Transformacja spektralnej radiancji (zarejestrowanej na poziomie czujnika) na temperaturę radiacyjną z zastosowaniem odwrotności prawa Plancka i przy użyciu stałych kalibracyjnych specyficznych dla kanału 6 TM/ETM+ LANDSAT (Irish, 2003):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_s} + 1\right)} \quad (2)$$

gdzie: K_1 i K_2 są stałymi kalibracyjnymi kanału termalnego dla konkretnego radiometru (tabela).

Etap 3

Obliczenie wartości temperatury powierzchni czynnej (LST) za pomocą algorytmu „pojedynczego okna” (Jiménez-Munoz, Sobrino, 2003; Sobrino i in., 2004; Jiménez-Munoz i in., 2009; Cristóbal i in., 2009):

$$LST = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_s + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (3)$$

gdzie: ε jest emisyjnością powierzchni czynnej; γ i δ to parametry zależne od funkcji Plancka; a ψ_1 , ψ_2 i ψ_3 są funkcjami atmosferycznymi (patrz: wzór 4a). Parametry γ i δ są wyliczane z wzorów:

$$\gamma = \left\{ \frac{c_2 L_s}{T_s^2} \left[\frac{\lambda^4 L_s}{c_1} + \frac{1}{\lambda} \right] \right\}^{-1} \quad (4a)$$

$$\delta = -\gamma \cdot L_s + T_s \quad (4b)$$

gdzie c_1 i c_2 są radiacyjnymi stałymi Plancka ($c_1 = 1,19104 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$; $c_2 = 1,43877 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$); λ oznacza efektywną długość fali (tabela).

Algorytm „pojedynczego okna” uwzględnia wpływ atmosfery oraz zróżnicowania właściwości emisyjnych różnych powierzchni Ziemi na pomiar.

Korygowanie danych pomiarowych o wpływ atmosfery

Aby skorygować dane pomiarowe o wpływ atmosfery obliczono specyficzne dla terenu badań parametry atmosferyczne (transmisyjność atmosfery – τ , oddolne promieniowanie atmosferyczne – L^\uparrow i odgórne promieniowanie atmosferyczne – L^\downarrow). Wykorzystano w tym celu „webowy” interfejs pod nazwą *Atmospheric Correction Parameter Calculator* (ACPC) (Barsi i in., 2003; 2005). ACPC dostępny jest pod adresem <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>. Narzędzie to używa globalnych profili atmosferycznych modelowanych w *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), modelu transferu promieniowania MODTRAN oraz algorytmów całkowania. ACPC wymaga podania dokładnej daty, czasu i położenia geograficznego. Istnieje również możliwość określenia lokalnych warunków (wysokość n.p.m., zmierzone wartości ciśnienia atmosferycznego, temperatury i wilgotności względnej powietrza), które determinują interpolację modelowanego profilu atmosferycznego. Dla prezentowanego w dalszej części artykułu przykładu (rys. 2) posłużono się danymi pomiarowymi ze stacji synoptycznej IMGW-PIB w Krakowie-Balicach.

Parametry atmosferyczne

Oszacowane dla wybranej lokalizacji parametry atmosferyczne (τ , L^\uparrow i L^\downarrow) służą następnie do wyliczenia funkcji atmosferycznych (ψ_1 , ψ_2 i ψ_3), będących koniecznymi zmiennymi wejściowymi do algorytmu „pojedynczego okna” (3). Funkcje atmosferyczne są zdefiniowane następująco:

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau} \quad (5a)$$

$$\psi_2 = -L^\downarrow - \frac{L^\uparrow}{\tau} \quad (5b)$$

$$\psi_3 = L^\downarrow \quad (5c)$$

Emisyjność powierzchni Ziemi

Aby oszacować emisyjność powierzchni Ziemi (*LSE – Land Surface Emissivity*) zastosowano metodę opartą o znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności (*Normalized Difference Vegetation Index – NDVI*). Wskaźnik ten bazuje na właściwościach radiacyjnych chlorofilu, który silnie absorbuje światło widzialne w procesie fotosyntezy, a także na strukturze komórek liści, która silnie odbija promieniowanie w zakresie bliskiej podczerwieni. NDVI dostarcza informację o pokryciu roślinnością zieloną (Tucker, 1979). W przypadku danych LANDSAT TM i ETM+, NDVI jest obliczane jako kombinacja 3 i 4 kanału spektralnego (*KS*):

$$NDVI = \frac{KS4 - KS3}{KS4 + KS3} \quad (6)$$

Metoda progów NDVI (*NDVI^{THM} – Normalized Difference Vegetation Index Thresholds Method*) zakłada stałe wartości progowe NDVI w celu rozróżnienia pikseli „glebowych” ($NDVI < NDVI_S$), pikseli z bujną roślinnością ($NDVI > NDVI_V$) oraz pikseli mieszanych ($NDVI_S \leq NDVI \leq NDVI_V$), złożonych z gleby i roślinności (Sobrino et al., 2008).

Wartości $NDVI_S = 0,2$ i $NDVI_V = 0,5$ zaproponowane przez Sobrino i Raissouni (2000) umożliwiają stosowanie metody w warunkach globalnych. W danej pracy ogólne założenia metody *NDVI^{THM}* zostały uproszczone. Przyjęto emisyjność pikseli z samą glebą równą 0,96 ($P_V = 0$ i $C_\lambda = 0$, więc $\varepsilon = \varepsilon_{S\lambda} = 0,96$), a emisyjność pikseli w pełni pokrytych roślinnością równą 0,99 ($P_V = 1$ i $C_\lambda = 0,005$, więc $\varepsilon = \varepsilon_{V\lambda} + C_\lambda = 0,985 + 0,005 = 0,99$). Emisyjność pikseli mieszanych obliczono za pomocą poniższego wzoru (Sobrino i in., 1990):

$$\varepsilon = \varepsilon_{V\lambda} \cdot P_{V\lambda} + \varepsilon_{S\lambda} \cdot (1 - P_V) + C_\lambda \quad (7)$$

gdzie: $\varepsilon_{V\lambda}$ i $\varepsilon_{S\lambda}$ to odpowiednio emisyjność dla bujnej roślinności i odkrytej gleby (dla kanału termalnego TM/ETM+ LANDSAT), P_V to udział roślinności (ułamkowe pokrycie roślinnością), C_λ jest wyrażeniem uwzględniającym wpływ wgłębień terenu związanych z szorstkością podłoża – jego wartość można wyliczyć następująco:

$$C_\lambda = (1 - \varepsilon_{S\lambda}) \cdot \varepsilon_{V\lambda} \cdot F' \cdot (1 - P_V) \quad (8)$$

gdzie: F' jest parametrem geometrii powierzchni o zakresie wartości między 0 a 1 (w tej pracy wybrano średnią wartość $F' = 0,55$).

Udział roślinności (P_V) został oszacowany z wartości NDVI według formuły podanej w pracy Carlson i Ripley (1997):

$$P_V = \left(\frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \right)^2 \quad (9)$$

Zastosowana w tej pracy metodyka obliczania LSE generuje błąd pomiędzy wartościami modelowanymi a pomiarowymi rzędu 1% (Sobrino i in., 2008). Trzeba jednak zauważyć, że metoda *NDVI^{THM}* zaniża wartości emisyjności dla wód do zakresu 0,90-0,93, podczas gdy w paśmie widzialnym i podczerwonym powinny być one bliskie 1. Jest to również istotna niedokładność, która podana została dalszej korekcji.

Zaniżone wartości LSE zostały skorygowane autorskim sposobem, w trzech krokach:

- 1) klasyfikacja pikseli „wodnych” poprzez podzielenie arytmetyczne obrazu z kanału 4 (NIR) przez obraz z kanału 1 (VIS Blue);
- 2) wyekstrahowanie obrazu wynikowego przez maskę wód utworzoną za pomocą *GMES Urban Atlas PL003L Dataset*² (usunięcie pikseli błędnie sklasyfikowanych jako wody);
- 3) przypisanie nowej wartości równej 0,995 wyekstrahowanym „wodnym” pikselom.

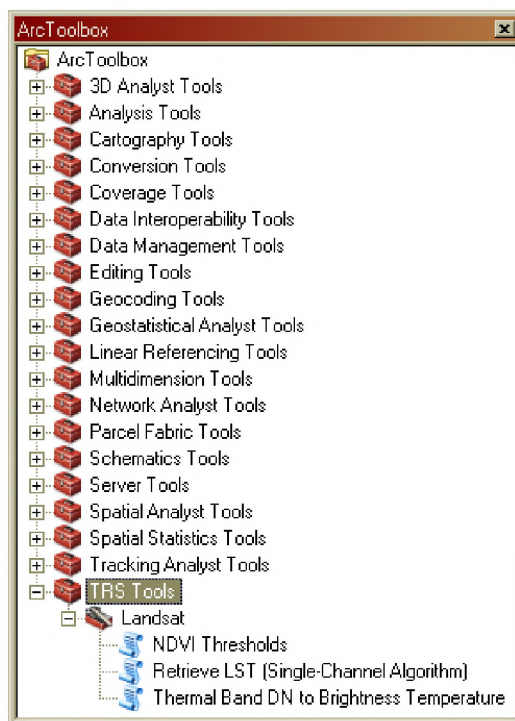
Otrzymane wartości wyjściowe LSE (ε) są niezbędną zmienną wejściową w algorytmie „pojedynczego okna” (3).

Zasadniczo zastosowanie metody $NDVI^{THM}$ dla obszarów zurbanizowanych nie jest idealnym rozwiązaniem z uwagi na olbrzymią zmienność powierzchni sztucznych o skrajnie różnych wartościach emisyjności. Jej zastosowanie jest pewnego rodzaju uproszczeniem przyjętym przez autorów przy założeniu, że zdecydowana większość pikseli w obszarach zurbanizowanych (biorąc pod uwagę rozdzielczość przestrzenną obrazów LANDSAT) jest pikselami mieszanymi, których wartość DN jest średnią ważoną odpowiedzi spektralnej zarówno powierzchni naturalnych, jak i sztucznych.

Pakiet narzędzi TRS Tools dla ArcGIS Desktop

Opracowany zestaw narzędzi *Thermal Remote Sensing (TRS) Tools* poszerza funkcjonalność programu ArcGIS Desktop o możliwość automatycznego przeliczenia wartości pikseli obrazów LANDSAT TM lub ETM+ do wartości emisyjności powierzchni, temperatury radiacyjnej oraz temperatury powierzchni z zastosowaniem opisanej powyżej procedury.

TRS Tools jest odrębną skrzynką narzędziową ArcToolbox (rys. 1), która zawiera zestaw narzędziowy *Landsat*, obejmujący trzy narzędzia utworzone z wykorzystaniem języka skryptowego Python:



Rys. 1. Skrzynka narzędziowa TRS Tools

² *GMES European Urban Atlas v.1.1* – wektorowa baza danych o pokryciu terenu dla dużych stref miejskich zamieszkałych przez więcej niż 100 000 mieszkańców. Kod: PL003L oznacza Aglomerację Krakowską. Klasa wód zawiera: stawy rybne (naturalne i sztuczne), rzeki (także skanalizowane) oraz kanały. Minimalna powierzchnia uwzględnionego obiektu na warstwie: 1ha. Źródło: Europejska Agencja Środowiska – EEA, *European Environmental Agency* (www.eea.europa.int), Mapping Guide for a European Urban Atlas v. 1.01, 2010.

Thermal Band DN to Brightness Temperature – służy do przeliczania wartości pikseli (DN) obrazu termalnego satelitów LANDSAT-5 TM i LANDSAT-7 ETM+ do radiancji spektralnej (L_s) i temperatury radiacyjnej (BT). Dane wyjściowe: obraz LANDSAT w kanale 6 TM/ETM+ i stałe: $gain$, $bias$, K_1 i K_2 .

Dodatkowo narzędzie umożliwia docięcie obrazu do zadanego zasięgu (obszaru badań) i daje możliwość transformacji wynikowych warstw rastrowych do układu PUWG-92.

NDVI Thresholds – pozwala wygenerować rastrową warstwę emisyjności powierzchni (LSE) na podstawie utworzonej wcześniej warstwy NDVI. Dane wejściowe: obrazy LANDSAT w kanale 3 i 4. Dodatkowo narzędzie umożliwia docięcie obrazu do zadanego zasięgu (obszaru badań) i daje możliwość transformacji wynikowych warstw rastrowych do układu PUWG-92.

Retrieve LST (Single-Channel Algorithm) – umożliwia wygenerowanie rastrowej warstwy temperatury powierzchni w K i °C (dane wejściowe: rastrowe warstwy radiancji spektralnej, temperatury radiacyjnej i emisyjności powierzchni, parametry atmosferyczne: τ , L^\uparrow , L^\downarrow).

Wykorzystanie danych LANDSAT i technik GIS do oceny zróżnicowania warunków termicznych miasta (na przykładzie aglomeracji krakowskiej)

Jednym z najczęstszych zastosowań obrazów termalnych LANDSAT i opracowywanych na ich podstawie map temperatury powierzchni Ziemi jest badanie zróżnicowania warunków termicznych w obszarach zurbanizowanych. Obrazy satelitarne o rozdzielczości przestrzennej 120 m i 60 m dają bowiem możliwość precyzyjnej oceny struktury termicznej mozaikowych powierzchni aglomeracji miejskich. Mozaikowość powierzchni miast wiąże się z dużą zmiennością przestrzenną typów użytkowania obszarów miejskich, powstałą w wyniku działalności człowieka. Jak wynika z wcześniejszych badań (Voogt, Oke, 2003; Weng i in., 2004; Stathopoulou, Cartalis, 2007; Walawender, 2006; 2009), rodzaj użytkowania terenu ściśle determinuje temperaturę powierzchni, a ta wyraźnie wpływa na temperaturę w przypowierzchniowej warstwie powietrza, co daje podstawy do wykorzystywania satelitarnych obrazów termalnych w badaniach intensywności miejskiej wyspy ciepła. Przy czym, w tego rodzaju badaniach niezbędna jest weryfikacja danych satelitarnych w oparciu o dane pozyskane za pomocą tradycyjnych pomiarów instrumentalnych.

Rysunek 2 przedstawia przykładową mapę temperatury powierzchni czynnej na obszarze miejsko-przemysłowej aglomeracji krakowskiej w dniu 26 lipca 2000 roku. Mapa utworzona została w programie ArcGIS Desktop z zastosowaniem procedury oraz narzędzi zaprezentowanych w artykule.

26 lipca 2000 roku był dniem ciepłym z maksymalną temperaturą powietrza w Krakowie-Balicach 26,6°C. Minimum temperatury powietrza poprzedniej nocy wyniosło 14,4°C. W godzinach 9-10 UTC temperatura powietrza miała średnią wartość 24,8°C, wilgotność względna wynosiła około 50%, a zachmurzenie było małe (na rysunku 2 widoczne chmury na północny-zachód od Krakowa). W godzinach przedpołudniowych wiał słaby wiatr z kierunków zmiennych.

Na utworzonej mapie widać wyraźnie duże zróżnicowanie przestrzenne temperatury powierzchni na obszarze Krakowa związane z dużą różnorodnością typów użytkowania terenu.

Najwyższą emisją ciepła antropogenicznego charakteryzuje się centrum miasta oraz obszary przemysłowe (przede wszystkim obszar kombinatu metalurgicznego), a także inne miejsca związane z intensywną działalnością człowieka. Najniższymi wartościami temperatury charakteryzują się powierzchnie akwenów wodnych oraz lasów i parków miejskich.

Uzyskanie bardziej szczegółowych informacji na temat zróżnicowania warunków termicznych na obszarze Krakowa i okolic miasta jest możliwe poprzez integrację map temperatury powierzchni, opracowanych na podstawie danych satelitarnych LANDSAT z innymi bazami danych przestrzennych z wykorzystaniem narzędzi GIS. Przykładem takiej analizy jest możliwość automatycznego obliczenia statystyk strefowych dla różnych klas użytkowania terenu oraz tworzenia wielokrotnych przekrojów poprzecznych dla dowolnej liczby warstw (Walawender, 2006; 2009). Szerokie zastosowanie ma również dostępna w GIS algebra map, która może zostać wykorzystana do obiektywnej analizy porównawczej map LST dla różnych terminów, czy na przykład celem określenia korelacji pomiędzy wartościami LST i NDVI, stosowanej przez niektórych autorów do określenia zasięgu oddziaływania miasta (Gallo i in., 1995; Gallo, Tarpley, 1996; Kim et al., 2005; Yuan, Bauer, 2007). Narzędzia GIS mogą zostać również wykorzystane podczas procedury walidacji map temperatury powierzchni z wykorzystaniem tradycyjnych pomiarów temperatury prowadzonych *in situ* (na powierzchni Ziemi).

Podsumowanie

Prezentowany algorytm „pojedynczego okna” umożliwia opracowanie map temperatury powierzchni Ziemi na podstawie danych LANDSAT TM i ETM+. Radiometry te wyposażone są tylko w jeden kanał termalny, co wymaga bardziej skomplikowanej procedury przetwarzania obrazu i co za tym idzie – sporej liczby przetworzeń. Dlatego niezbędne było opracowanie zestawu narzędzi umożliwiającego generowanie tych map w sposób automatyczny. Opracowany zestaw narzędzi *TRS Tools* dla ArcGIS Desktop może zostać udostępniony przez autorów do celów naukowych.

Dane LANDSAT stanowią ciekawe źródło informacji o temperaturze powierzchni czynnej, które może być wykorzystane podczas badań zróżnicowania warunków termicznych na obszarach zurbanizowanych, pomimo niskiej rozdzielczości czasowej. Atutem tych danych jest stosunkowo wysoka rozdzielczość przestrzenna, która pozwala w sposób bardziej precyzyjny oszacować wielkość kontrastu termicznego pomiędzy różnymi rodzajami powierzchni, powstałego wskutek zróżnicowania ich właściwości emisyjnych. Pozyskane na podstawie tego typu badań informacje mogą stanowić podstawę dla działań prowadzących do neutralizacji zakłóceń równowagi termicznej w obrębie miasta, a co za tym idzie, poprawy jakości życia ludzi.

Literatura

- Barsi J.A., Barker J.L., Schott J.R., 2003: An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument. Proc. IEEE IGARSS, 21-25 July 2003, Toulouse, France, 3014-3016.
- Barsi J.A., Schott J.R., Palluconi F.D., Hook S.J., 2005: Validation of a Web-Based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments. Earth Observing Systems X, Proc. SPIE, Vol. 5882, August 2005, Bellingham, WA.
- Carlson T.N., Ripley D.A., 1997: On the relation between NDVI, fractional vegetation cover and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62, 241-252.

- Chander G., Markham B.L., Helder D.L., 2009: Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing Environment*, 113, 893-903.
- Cristóbal J., Jiménez-Munoz J. C., Sobrino J. A., Ninyerola M., Pons X., 2009: Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapour air temperature, *Journal of Geophysical Research*, 114, D08103, doi: 10.1029/2008JD010616.
- Gallo K.P., McNab A.L., Karl T.R., Brown J.F., Hood J.J., Tarpley J.D., 1993: The use of a Vegetation Index for Assessment of the urban heat island effect, *International Journal of Remote Sensing*, 14, 2223-2230.
- Gallo K.P., Tarpley J.D., 1996: The comparison of vegetation index and surface temperature composites for urban heat island analysis, *International Journal of Remote Sensing*, 17, 3071-3076.
- GMES – Mapping Guide for a European Urban Atlas v. 1.01, 2010. www.eea.europa.int
- Irish R., 2003: Landsat 7 Science Data User Handbook, NASA Goddard Space Flight Centre, Greenbelt, Md. <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov>
- Jiménez-Munoz J.C., Sobrino J.A., 2003: A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, *Journal of Geophysical Research*, 108 (D22), 4688, doi: 10.1029/2003JD003480.
- Jiménez-Munoz J.C., Cristóbal J., Sobrino J.A., Soria G., Ninyerola M., Pons X., 2009: Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 339-349, doi: 10.1109/TGRS.2008.2007125.
- Kim H.M., Kim B.K., You K.S., 2005: A statistic correlation analysis algorithm between land surface temperature and vegetation index, *Journal of Information Processing Systems*, 1, 102-106.
- Landsat Program webpage. <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Osińska-Skotak K., Madany A., 1996: Wykorzystanie danych satelitarnych LANDSAT TM do określenia warszawskiej wyspy ciepła, Zesz. Nauk. Polit. Warsz., *Inżynieria Środowiska*, 26, 6-33.
- Sobrino, J.A., Li Z.-L., Stoll, M.P., 1990: Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 44, 345-354.
- Sobrino J.A., Raissouni N., 2000: Toward Remote Sensing methods for land cover dynamic monitoring. Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 353-366.
- Sobrino J.A., Jiménez-Munoz J.C., Paolini L., 2004: Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5, *Remote Sensing of Environment*, 90, 434-440.
- Sobrino J. A., Jiménez-Munoz J.C., Soria G., Romaguera M., Guanter L., Moreno J., Plaza A., Martínez P., 2008: Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46, 316-327, doi:10.1109/TGRS.2007.904834.
- Stathopoulou M., Cartalis C., 2007: Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece. *Solar Energy*, 81, 358-368.
- Tucker C.J., 1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of the Environment*, 8, 127-150.
- Voogt J. A., Oke T. R., 2003: Thermal remote sensing of urban climates, *Remote Sensing of Environment*, 86, 370-384.
- Walawender J., 2006: Zastosowanie danych satelitarnych serii Landsat i technik GIS w badaniach krakowskiej wyspy ciepła, *Annales UMCS Sectio B*, 61, 446-457.
- Walawender J., 2009: Wykorzystanie danych satelitarnych Landsat i technik GIS w badaniach warunków termicznych miasta (na przykładzie aglomeracji krakowskiej), *Prace Geograficzne, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ*, 122, 81-98.
- Walawender J., Hajto M., 2009: Assessment of thermal conditions in urban areas with use of different satellite data and GIS, Proc. 2009 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 21-25 September 2009, Bath, United Kingdom.
- Weng Q., Lu D., Schubring J., 2004: Estimation of land surface temperature - vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*, 89, 467-483.
- Yuan F., Bauer M.E., 2007: Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 106, 375-386.

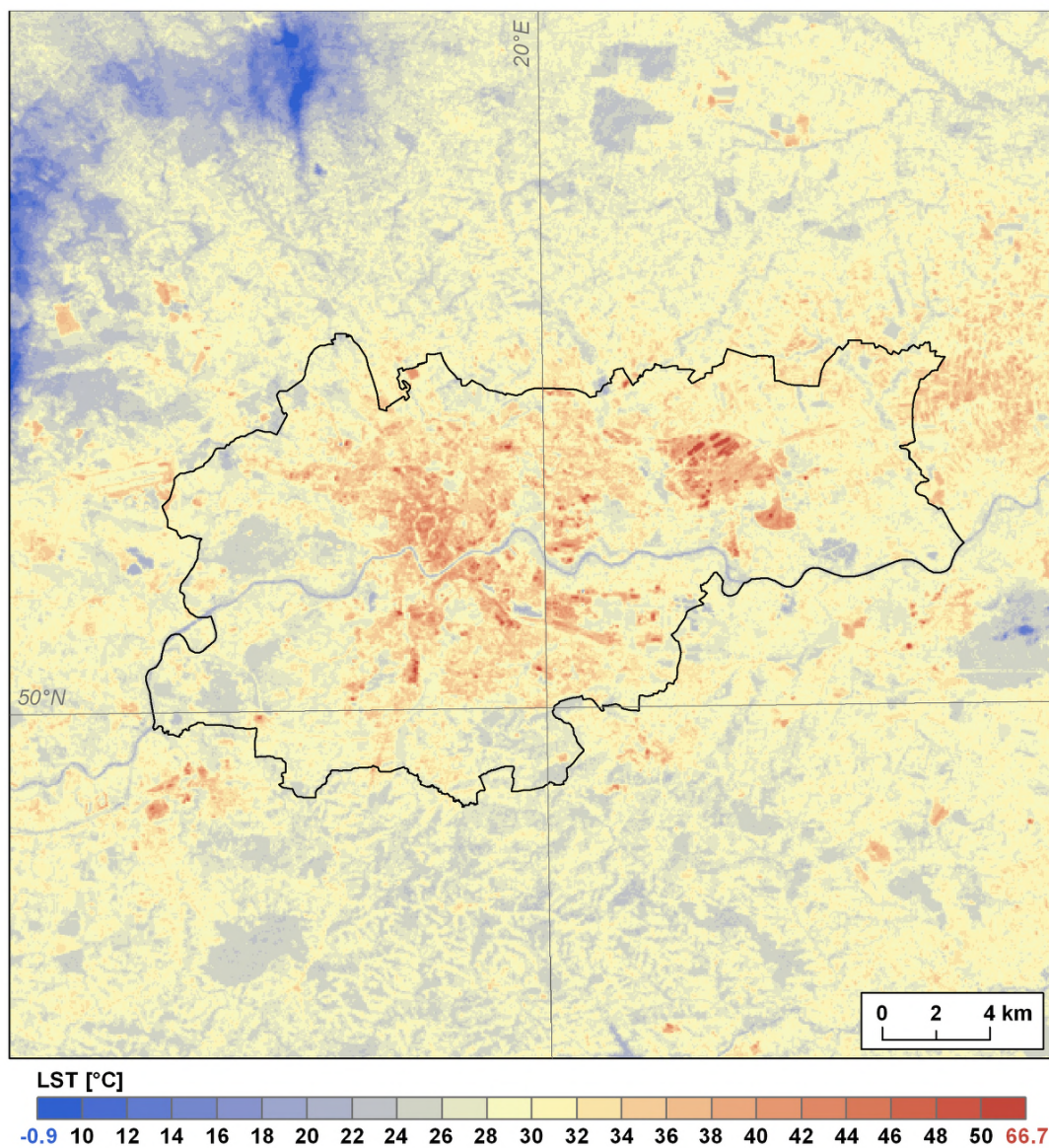
Abstract

This is a comprehensive paper in Polish including a detailed explanation of land surface temperature extraction algorithm formed by J. C. Jiménez-Muñoz and J. A. Sobrino. The paper presents TRS Tools – additional ArcGIS Desktop toolset for automatic brightness temperature, land surface emissivity and land surface temperature extraction developed by the authors. A special attention was paid to practical use of land surface temperature maps derived from LANDSAT data for the research on spatial distribution of thermal condition in urban areas exemplified by agglomeration of Krakow. A sample LST map was presented. Some possibilities of the use of GIS in order to perform more detailed analysis based on integration of the created maps with spatial data from another sources were discussed.

mgr Jakub Walawender
doktorant w Zakładzie Klimatologii
Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ
jakub.walawender@imgw.pl
jakub.walawender@uj.edu.pl
tel.: 012 63-98-122

mgr Monika Hajto
monika.hajto@imgw.pl
tel.: 012 63-98-117

Piotr Iwaniuk
piwaniuk@esripolska.com.pl
tel.: 022 390-47-27



Rys. 2. Temperatura powierzchni Krakowa i okolic miasta w dniu 26 lipca 2000 roku, godz. 9:24 UTC